

文章编号:1000-0550(2017)03-0552-09

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.03.013

琼东南盆地莺歌海组重力流沉积演化过程

付超¹,于兴河¹,金丽娜¹,董亦思²,单新³,何玉林⁴

1.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083

2.中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

3.国家海洋局第一海洋研究所海洋沉积与环境国家海洋局重点实验室,山东青岛 266061

4.国土资源部广州海洋地质调查局,广州 510760

摘要 琼东南盆地是我国重要的油气富集区和水合物前景区,研究其深水沉积体系的展布和演化过程对于油气和水合物勘探具有重要意义。利用高精度三维地震资料,对琼东南甘泉凸起西部陆坡沉积体系进行研究。通过地震相识别的方法,分析了该地区浊积水道和滑塌体两种不同成因沉积体的沉积特征:浊积水道受底流作用影响,和陆坡走向平行,发育有不对称的天然堤;通过地震剖面的精细解释,在水道上部 and 下部发育两套滑塌体:下部滑塌体为正常滑塌体,由多期的滑塌过程组成,滑塌体叠置现象明显;上部为水道注入型滑塌体,由于外部流体的注入,使水体的密度和黏度下降,故滑塌范围较广,成层性明显。通过均方根属性切片与沉积模式重建的方法,将其沉积过程分成三期:即滑塌、侵蚀和再滑塌并受底流改造三个阶段。

关键词 滑塌;浊积水道;沉积特征;演化过程;琼东南盆地

第一作者简介 付超,男,1992年出生,硕士研究生,沉积学,E-mail: fuchaopjb@163.com

通讯作者 于兴河,男,教授,E-mail: billyu@cugb.edu.cn

中图分类号 P618.13 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

琼东南盆地位于南海北部陆坡上,晚中新世重力流沉积十分发育,莺歌海组主要发育滑塌与浊积水道沉积^[1-3]。浊积水道和滑塌体垂向上相互叠置,平面上相互交切^[4]。从地震剖面上,琼东南盆地莺歌海组中可以识别出两套滑塌体,其滑塌体的类型、发育规模、沉积特征均不相同^[5-6],滑塌沉积类型多样,需进一步明确其成因机制。

随着对深海油气和矿产的勘探,滑塌体由于其独特的储集特性而日益受到关注。Görler^[7]提出滑塌堆积体的概念,将其定义为外来岩块的沉积,形成于陆壳拉张分裂阶段的陆坡或沉积盆地陡坡上。Walker *et al.*^[8]在研究滑塌体分类时提出了经典的海底扇模式。Heck *et al.*^[9]对滑塌体的形成背景和沉积特征进行研究。李胜利等^[10]在研究琼东南盆地新近纪构造沉降特征中指出该地区不同时期沉降速率不同。Gong *et al.*^[3]在琼东南盆地中央峡谷附近识别出两套滑塌体,但并未对其形成机制和演化过程进行研究。本研究以琼东南盆地莺歌海组为例,对莺歌海组不同

类型的滑塌体沉积特征进行介绍与对比,并分析琼东南水道伴生重力流沉积演化过程。

Stow^[11]和Apel *et al.*^[12]提出单相等深流对深水砂体的改造作用;Shepard^[13]和Bouma *et al.*^[14]局限区域内(海底峡谷)的底流和潮汐流也可以对滑塌体进行改造。前人研究普遍认为外部流体注入,会对滑塌体的展布和物性有较大的改变。琼东南地区滑塌体与浊积水道相互叠置、复杂错乱,浊积水道和滑塌体间相互叠置,故其沉积演化有待重建。

1 区域地质概况

琼东南盆地位于海南岛以南、西沙群岛以北的海域,本次研究区位于盆地西南部,工区面积400 km²,工区呈NE—SW向展布,水深西高东低,平均水深1 500~2 000 m,地形非常平缓(图1A)。

琼东南盆地经历了裂陷期(65~20 Ma)、热沉降期(20~5 Ma)和新构造运动期(5~0 Ma)三个构造运动期次^[15-16]。形成南断北超的特点,构造区划在平面形态上呈菱形,具有明显的“南北分带、东西分块”特征,表现为“三拗两隆”的构造格局(图1B)^[10,17]。

收稿日期:2016-07-15;收修改稿日期:2016-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41272132);国家专项项目(GZH2011003-05-02-02)[Foundation: National Natural Science Foundation of China. No.41272132; National 127 Project. No. GZH2011003-05-02-02]

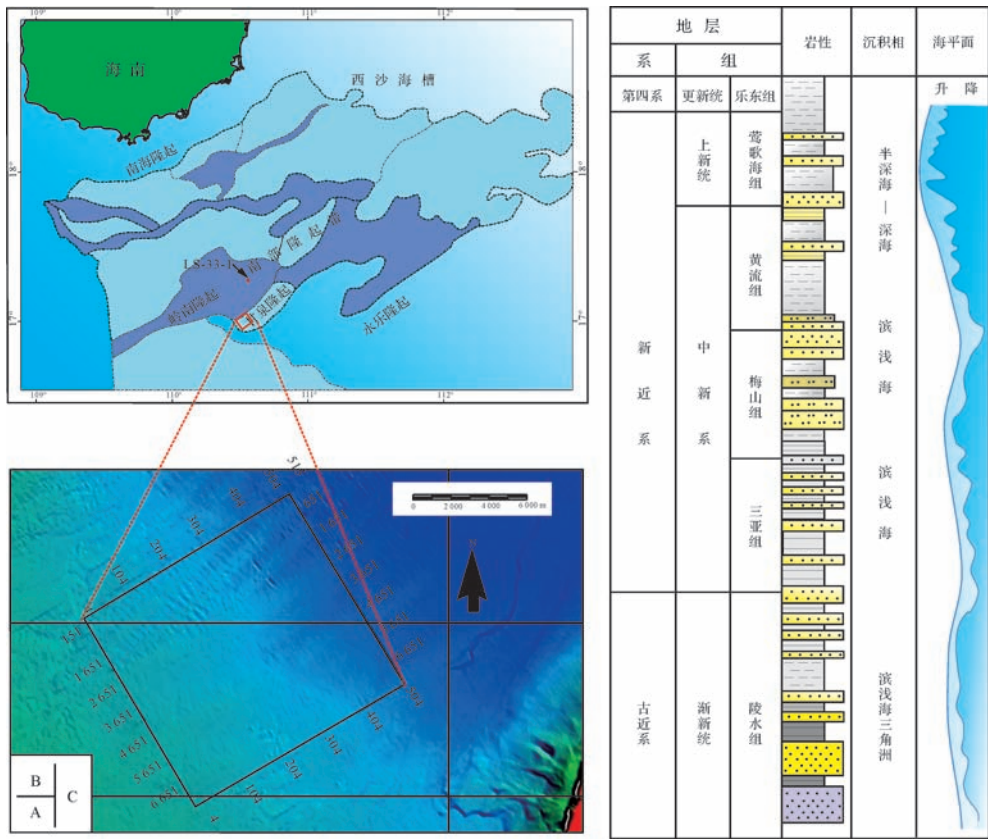


图1 研究区位置、地形与综合柱状图

A.海底地形特征;B.琼东南构造分区图;C.琼东南地区晚渐新统一更新统综合柱状图

Fig.1 Location, topography and integrated histogram of Qiongdongnan Basin

琼东南盆地裂陷期的主要沉积过程受红河断裂的走滑运动控制,红河断裂在 35~20 Ma,为左旋走滑;5.5 Ma 之后为右旋走滑。这次构造反转引起的沉积失稳,使滑塌体在莺歌海组广泛发育^[18]。

本研究的主要层段为上新统的莺歌海组(图1C),为一套海平面逐渐下降,以泥岩粉砂岩为主的浅海—半深海沉积相沉积^[16,19-20]。上覆地层为第四系乐东组,以浅灰色、绿灰色黏土(岩)为主,夹薄层粉砂、细砂,富含生物屑,未成岩。下覆地层为中新统黄流组,由于该时期海平面逐渐上升,故为一套粒度向上变细的半深海—深海沉积^[21-22]。

琼东南盆地滑塌体主要为南部陆坡进积型供源,甘泉隆起为该区滑塌提供物源^[22-23],其长轴方向为NW向堆积。研究区浊积水道为西北方向,与红河水系平行。依据前人的锆石和重矿物研究认为浊积水道物源为西北部红河水系和越南东部水系^[19,23-25]。浊流作用受平行于中央峡谷的地形影响,多形成近NEE向水道。根据 Gong *et al.*^[24]研究,该地区的盐度差异引起海底底流较为发育,底流对浊积水道的走

向有一定作用,使其与中央峡谷走向方向更加平行,进而其发育方向和早期形成的滑塌体近乎垂直^[26-27]。同时由于水道物源与滑塌体完全不同,因此可以对其产生一定的侵蚀和改造。

2 莺歌海组重力流沉积特征

琼东南盆地深水区钻井较少,但地震测线覆盖广,因此借助地震地层学方法,综合研究目的层各沉积相的沉积特征^[28]。通过地震相识别,认为杂乱相为滑塌体、充填相为水道,楔状下超相为天然堤^[24,29]。将一系列的剖面按其发育平行排列,通过不同剖面的边界和内部同相轴的样式来研究各沉积体的沉积特征。

2.1 滑塌体

琼东南地区在地震剖面上可以识别出两种类型的滑塌体:正常滑塌体和g水道注入型滑塌体。Martinsen^[30]对滑塌体内部进行三分,划分为头部、体部和尾部。本次研究依据地震剖面对每个部分的沉积特征进行描述。

2.1.1 正常滑塌体

通过地震识别等方法,在水道沉积的底部,可以发现大量早上新世的滑塌体(2 100 ms 处),在地震剖面上厚度多在 75 m 之上,形状呈现出丘形和楔形,与其他地层之间呈现逐渐尖灭的渐变接触关系,或者是近乎垂直的突变接触关系,连续性差—中、振幅中—弱。剖面 D—A 滑塌体的宽度变化不大(图 2),内部反射整体较为杂乱说明其搬运粒度较粗,为杂乱堆积。从剖面深度上可以看出,上上新统时地形坡度不大,故滑塌体无法获得更大的能量继续滑动,从而不易连续滑动,进而发育为限制型滑塌体。

通过分析丘状地震相发育的方位和规模,认为研究区可识别多个滑塌体相互叠置。扇体在滑塌过程中尾部常有的挤压逆冲构造发育,通过应力分析,认为滑塌体处于挤压应力环境,也说明搬运体在研究区内已经演变为碎屑流。滑塌体的剖面特征显示逆冲断层为由南向北的应力挤压形成的,指示其滑塌体的重力流是从南部斜坡带流入研究区域。王英民等^[31]认为滑塌体是沉积在东南部斜坡上的第四纪沉积物在一定的诱发机制作用下,沿南东—北西向流入研究区,流动过程中形成了碎屑流,在平坦开阔地带流体逐渐失去动能,形成目前研究区的块体搬运沉积体系。

根据 Frey-Martínez *et al.*^[32]对滑塌体的分类,早上新统形成的滑塌体多为限制性滑塌体。剖面 D 为滑塌体顶部,内部同相轴杂乱,整体较均一;剖面 C 为两期相互叠置滑塌体,滑塌体内部开始出现分层现象,即滑塌体上部同相轴较为杂乱,而下部同相轴较为连续;剖面 B 为滑塌体的体部,其底部剪切作用十分明显;剖面 A 为滑塌体的根部,显示出限制性滑塌

体的前端挤压挠曲。

2.1.2 水道注入型滑塌体

在水道沉积的上部,也发育一期大规模的滑塌体(2 000 ms 处),在地震剖面上厚度多在 30 m 左右,形状呈现出楔形和席状相。该期滑塌体在平面上分布规模较大;在尾部,反射同相轴由断续,振幅中—弱向同相轴连续变化,未出现小型逆冲构造。同时水道注入型滑塌体下切侵蚀能力有限,与下覆沉积体整合接触(图 3)。

剖面 D 为改造型滑塌体的顶部,内部同相轴较为杂乱,具有和正常滑塌体相似的为尾部;剖面 C、B 为滑塌体部,滑塌体宽度增加很快,同相轴内部逐步趋于平行,说明粒度逐渐变细。剖面 A 为滑塌体的底部,呈现席状杂乱相,同相轴连续,主要沉积作用由块体搬运沉积向漫溢沉积转化。

2.1.3 两类滑塌体对比

通过两期滑塌体沉积特征的对比,发现上部滑塌体的流动性要远优于底部滑塌体。临近研究区的 LS-33-1 有测井曲线(图 4),其井位于岭南低凸起西北侧,和甘泉低凸起相聚小于 40 km,构造背景与工区一致^[20,33-34]。上莺歌海组粒度较细,多为块状泥和粉砂质沉积,杂基支撑;而下莺歌海组,粒度相对较粗,为较为均质的正粒序,颗粒支撑。从测井曲线上认为下部正常滑塌体的测井曲线自然伽马值幅度变化较大,呈现为多期不对称的漏斗形;而上部水道注入型滑塌体,伽马值变化不大,整体较为平缓。

通过对研究区西北部的顺滑塌物源方向的地震剖面进行解释,在 2 020 ms 处可以识别多期楔状杂乱相叠置,滑塌体头部具有小型的逆冲构造,头部—

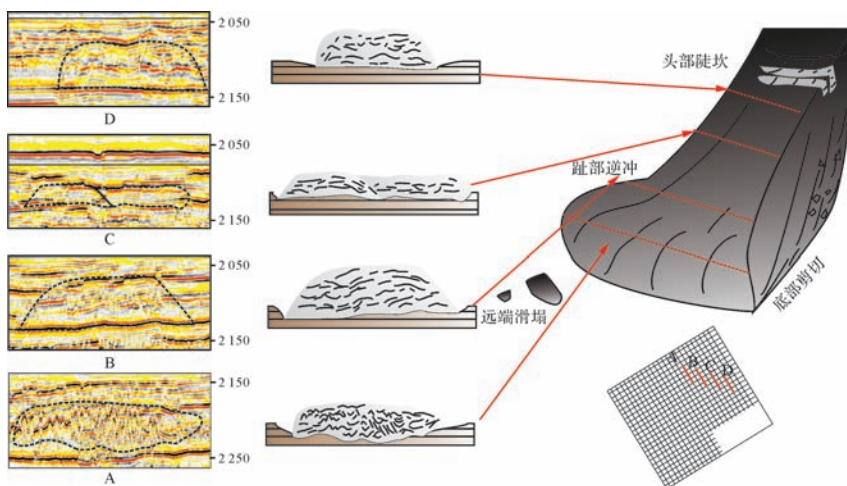


图 2 正常滑塌体沉积特征和模式图

Fig.2 The sedimentary characteristics and model of normal slump sheet

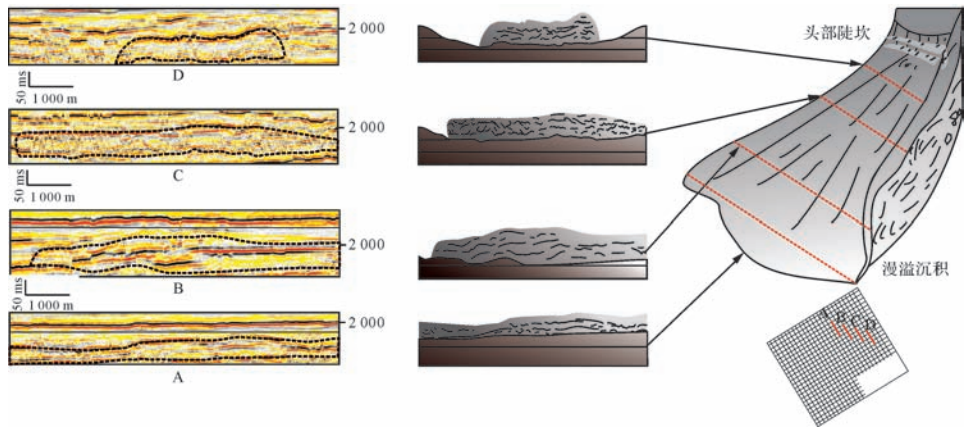


图3 水道注入型滑塌体沉积特征和模式图

Fig.3 The sedimentary characteristics and model of slump sheet reconstructed by underflow channel

体部—尾部较为均一,这种为正常滑塌沉积。而在2 000 ms处可以见到席状杂乱相,其局部可见连续的同相轴,但整体较为杂乱,沿伸范围较大,厚度较薄,这些特征被认为是水道注入型滑塌体的地震标志^[35-36]。

上部滑塌体为水道注入型滑塌体,由于浊积水道的注入,引入大量浊流的细粒沉积物,斜坡上未固结部分和浊流相互混合,降低其流动的黏度,流动性增强,故滑塌面积较大,而下切侵蚀能力较弱。同时由于浊积水道发育大量的天然堤复合体,其粒度较细,在未完全成岩的条件下可以为上部滑塌体向下滑动起到润滑作用。而底部的滑塌体多由沉积失稳引起的,粒度较粗,下切侵蚀作用十分明显,发育规模有限。通过对工区内上新世进行时间切片,发现下莺歌海组滑塌体呈现多期叠置的现象,故认为其形成过程没有外界流体的干扰,为正常滑塌体。

2.2 浊积体系

上新世,红河水系和海南岛沉积物大量供给,红

河断裂带由左旋走滑转变为右旋走滑,使得沉积水动力条件增强^[37-39]。由于浊流能量较强,形成的大型水道或沟槽内部充填着高含砂率的垂向加积序列。水道及天然堤复合体沉积体系主要发育于陆坡下倾方向,该体系由水道充填沉积、近缘天然堤、远源天然堤、决口扇、水道末端朵叶体组成。该类沉积体系多发育在陆坡底部和盆地内部。水道通常一直保持浊流特征,其代表相对长期的沉积物搬运通道^[40-41]。天然堤为沉积物重力流溢出堤岸并侧向延伸超过水道边缘的细粒沉积。由于重力流漫溢时速度下降很快,致使近源天然堤很厚而远源很薄,呈现海鸥翼状。

结合地震剖面识别(图5),在研究区内自西向东识别出多期水道—天然气堤沉积体系。图中剖面F为深切的“V”型单水道,主要发育于水道顶部,坡度较陡,随着向东坡度的减缓,水道限制作用的减弱,剖面E中水道形态演变为“W”型,水道深度变小,甚至

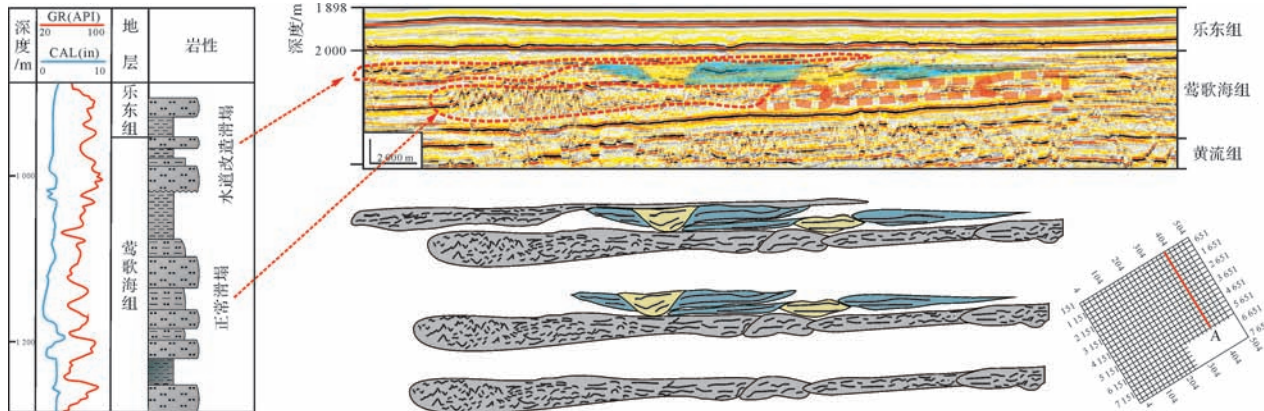


图4 LS-33-1综合柱状图,两期滑塌体井震对比(井位见图1)

Fig.4 Integrated histogram of LS-33-1, comparison the core-seismic between two kings of slump

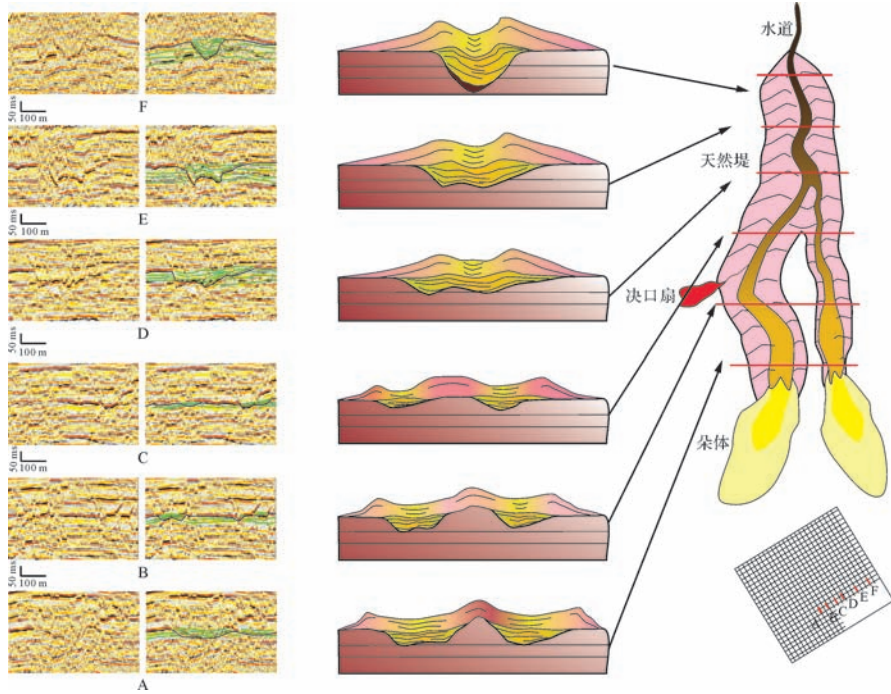


图 5 浊积水道沉积特征及模式图

Fig.5 The sedimentary characteristics and model of turbidite channel

在剖面 C 中,水道发生了分叉,后期逐渐演化为双水道。这一系列的水道演化正符合地貌自西向东的阶梯状减小。水道内部同相轴也发生改变,剖面 F、E、D 多为充填前积相和充填杂乱相,说明水道顶部沉积充填速度较快,剖面 B、A 水道内部变为充填平行相,由于水道变浅,在尾端主要沉积细粒的沉积物。

3 琼东南水道伴生重力流沉积演化过程

通过上新世的地震切片可以识别出不同时期沉积相的展布规律,选取 10 ms 为时窗提取 RMS 属性,根据 LS-33-1 的井震标定,其高值区代表粒度较粗的沉积体^[42],再利用剖面各个时期的层位进行分解,从而保证各个时期演化过程中平面和剖面的一致。基于上述各沉积体的沉积特征,以基准面旋回为依据,按 1 Ma 的时间尺度,将上新统莺歌海组划分成三个阶段(图 6):沉积失稳—滑塌阶段、水道发育侵蚀阶段和多重作用—再滑塌阶段。

3.1 沉积失稳—滑塌阶段

碎屑流滑塌体为该时期的主要沉积体,单个滑塌体的规模较小。从 RMS 振幅属性图上可以识别出,单个滑塌体的面积小于 50 km²,发生多期滑塌体叠置的现象明显,整个滑塌区呈 NWW 向垂直陆坡展布(图 7A)。该期滑塌体的主要特征为滑塌体整体均

匀,下切剪切能力较强。从剖面上丘状杂乱相和楔状杂乱相发育,证明该时期碎屑流整体搬运能力较强。体部和尾部搬运能力相近,搬运过程在尾部有限制性滑塌特征,表现为小型的逆冲构造。

早期的滑塌体发育于莺歌海组底部,在早上新世由南部的甘泉隆起供源。滑塌体分布有限,滑塌体周围可见小型滑块,为滑塌过程中从滑塌体上散落的部分。除滑塌部分,其余从地震剖面上为连续强反射现象,反映了其深海—半深海海底细粒沉积物。

该阶段研究区西北部可识别水道充填沉积,而在研究区南部主要为大量的楔状杂乱相沉积。通过恢复该时期的古地貌,此时研究区坡度为新近纪以来最大的。该阶段的水道和滑塌体主要受重力作用,相互间没有发生交切。

3.2 水道发育—侵蚀阶段

受侵蚀下切作用形成的水道,受海底底流的作用下发生侧向迁移。并在晚上新世时期流进研究区,对滑塌体进行切割。同时由于滑塌体使海底地形不平,故侵蚀水道一般发育两边不对称的天然堤。由于水道侵蚀下切能量有限,故河道水流满溢显现明显,发育大规模的满溢席状砂,在剖面上反应为同相轴连续,偶见下超。根据 Sprague^[43]对水道的分类,将其归为水道层。受远端红河水系和中央峡谷的影响,其

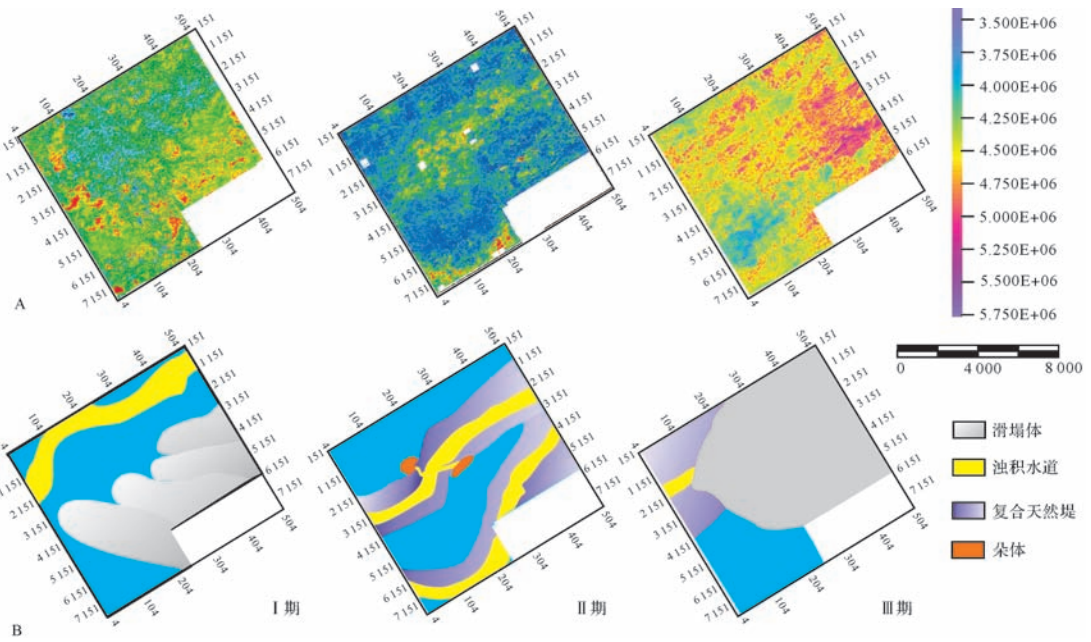


图6 琼东南盆地新近系沉积演化的三个阶段

A. RMS 属性图; B. 沉积相展布图

Fig.6 The three stages of Neogene sedimentary evolution

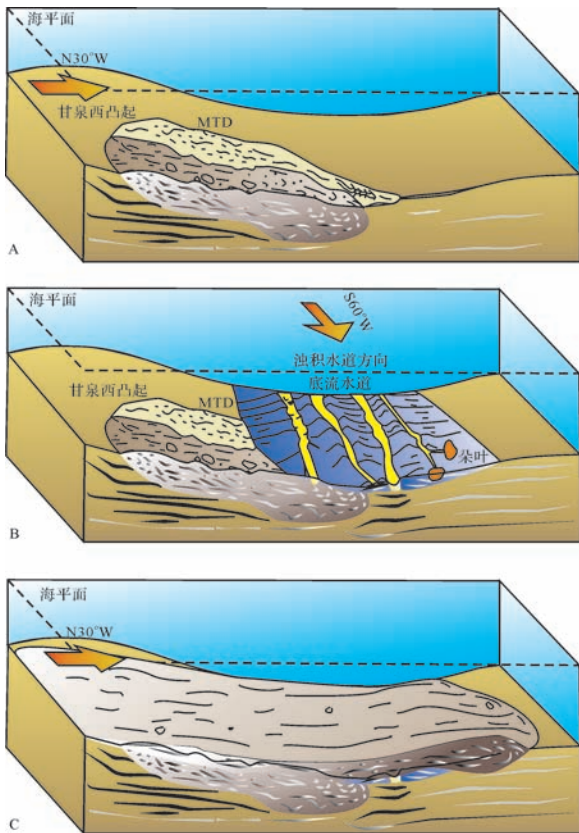


图7 琼东南盆地莺歌海组重力流沉积演化过程示意图
A. 沉积失稳—滑塌阶段演化阶段; B. 水道发育—侵蚀阶段; C. 再滑塌阶段演化阶段

Fig.7 The gravity flow deposit process schematic model of the Yinggehai Formation in Qiongdongnan Basin

水道内部多充填浊流沉积体。粒度较细的正粒序堆积,并且在河流发育初期快速充填现象较为明显。在水道的尾端发育朵叶体。

从分频属性切片和相干体技术上可以识别出水道的流动方向和范围。研究区内有两条水道,根部分成两个分支水道(图7B),以NEE向注入滑塌体内。该时期的水道从剖面上多为“U”型和“W”型,研究发育大量天然堤复合体对上一阶段形成的滑塌体进行覆盖。

3.3 多重作用—再滑塌阶段并受底流改造

该期主要发育滑塌体,但其不同于滑塌阶段的滑塌体,其同相轴连续性增强,内部杂乱现象不明显,并且头部有明显的变大,表现为头部大于体部的特征。该期滑塌体发育较大,不仅全工区内发育,在甘泉隆起—岭南低凸起都有发育。该阶段海平面继续上升,随着来自红河水系和南部的物源不断供给,使其滑塌过程不仅有来自西南向浊积水道的沉积物,同时也混合了南部供源的滑塌体堆积物。

在平面上出现大规模滑塌体,其滑塌体规模可以覆盖整个研究区。通过恢复该时期的古地貌,可以发现该时期地势相对较平。该期滑塌体主要由于水道注入对其物性的改变,以及浊积水道的细粒天然堤复合体对滑塌体移动的润滑作用所共同作用的结果。认为是由于中部水道的注入,推测颗粒间接触关系有原来的颗粒接触变成杂基接触,不仅整体粒度变细,

并且其流动性增强。

4 结论

(1) 通过地震相识别和属性提取的方法,分析了该地区水道和滑塌体两种主要沉积体的特征:伴生水道受底流迁移作用影响,和陆坡走向平行,发育有不对称的天然堤,对下覆的滑塌体下切作用明显,下切剖面形态发育有“V”、“U”、“W”和复合型;滑塌体可以分成两期,底部正常滑塌体和顶部底流改造滑塌体,其中正常滑塌体粒度较粗,滑塌范围有限,多期叠置现象明显。底流改造滑塌体,粒度相对较细,范围较大,与底部滑塌体相比具有较高的可流动性。

(2) 底流注入是引起两期滑塌体不同的主要原因,浊积水道浊流的细粒沉积物注入滑塌体内,使滑塌体的密度和黏稠度下降,更便于流动;除此之外大面积的天然堤还在滑塌体底部形成有利于其滑动的润滑层。

(3) 结合早更新世后的时间切片和地震相垂向演化特征,将研究区第四系分成滑塌、侵蚀和再滑塌三个阶段,从演化过程上比较各期滑塌体的异同。上新统莺歌海组沉积期,滑塌体分布规模和范围不断发生改变,由南部供源逐步转为东南供源。

参考文献 (References)

- [1] 吴时国,秦蕴珊. 南海北部陆坡深水沉积体系研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 922-930. [Wu Shiguo, Qin Yunshan. The research of deepwater depositional system in the northern South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 922-930.]
- [2] 许怀智,蔡东升,孙志鹏,等. 琼东南盆地中央峡谷沉积充填特征及油气地质意义[J]. 地质学报, 2012, 86(4): 641-650. [Xu Huaizhi, Cai Dongsheng, Sun Zhipeng, et al. Filling characters of central submarine canyon of Qiongdongnan Basin and its significance of petroleum geology[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(4): 641-650.]
- [3] Gong Chenglin, Wang Yingmin, Hodgson D M, et al. Origin and anatomy of two different types of mass-transport complexes: a 3D seismic case study from the northern South China Sea margin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 54: 198-215.
- [4] 苏明,沙志彬,乔少华,等. 南海北部神狐海域天然气水合物钻探区第四纪以来的沉积演化特征[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2975-2985. [Su Ming, Sha Zhibin, Qiao Shaohua, et al. Sedimentary evolution since Quaternary in the Shenhu hydrate drilling area northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2975-2985.]
- [5] Yu Xinghe, Wang Jianzhong, Liang Jinqiang, et al. Depositional characteristics and accumulation model of gas hydrates in northern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 56: 74-86.
- [6] 黄卫,解习农,何云龙,等. 琼东南盆地中央峡谷西段莺歌海组沉积演化及储层预测[J]. 沉积学报, 2015, 33(4): 809-816. [Huang Wei, Xie Xinong, He Yunlong, et al. Evolution and reservoir prediction of Yinggehai Formation in western central canyon in Qiongdongnan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(4): 809-816.]
- [7] Görler K, Reutter K J. Entstehung und Merkmale der Olisthostrome[J]. Geologische Rundschau, 1968, 57(2): 484-514.
- [8] Walker J R, Massingill J V. Slump features on the Mississippi fan, northeastern gulf of Mexico[J]. Geological Society of America Bulletin, 1970, 81(10): 3101-3108.
- [9] Heck F R, Speed R C. Triassic olistostrome and shelf-basin tectonics in the western Great Basin: Paleogeographic implications[J]. Geological Society of America Bulletin, 1987, 99(4): 539-551.
- [10] 李胜利,沙志彬,于兴河,等. 琼东南盆地新近纪构造沉降特征对 BSR 分布的影响[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 163-175. [Li Shengli, Sha Zhibin, Yu Xinghe, et al. Impact of Neogene tectonic subsidence characteristics on the BSR distribution in Qiongdongnan Basin[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 163-175.]
- [11] Stow D A V. Method for silt and sand fabric analysis in deep-sea cores[J]. Journal of Sedimentary Research, 1979, 49(2): 627-630.
- [12] Apel J R, Holbrook J R, Liu A K, et al. The Sulu sea internal Soliton experiment[J]. Journal of Physical Oceanography, 1985, 15(12): 1625-1651.
- [13] Shepard F P. Importance of submarine valleys in funneling sediments to the deep sea[J]. Progress in Oceanography, 1963, 3: 321-332.
- [14] Bouma A H, Normark W R, Barnes N E. Submarine fans and related turbidite systems[M]. New York: Springer-Verlag, 1985.
- [15] 雷超,任建业,裴健翔,等. 琼东南盆地深水构造格局和幕式演化过程[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2011, 36(1): 151-162. [Lei Chao, Ren Jianye, Pei Jianxiang, et al. Tectonic framework and multiple episode tectonic evolution in deepwater area of Qiongdongnan Basin, northern continental margin of South China Sea[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(1): 151-162.]
- [16] 张功成,刘震,米立军,等. 珠江口盆地—琼东南盆地深水区古近系沉积演化[J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 632-641. [Zhang Gongcheng, Liu Zhen, Mi Lijun, et al. Sedimentary evolution of Paleogene series in deep water area of Zhujiangkou and Qiongdongnan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(4): 632-641.]
- [17] 雷超,任建业,李绪深,等. 琼东南盆地深水区结构构造特征与油气勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 560-569. [Lei Chao, Ren Jianye, Li Xushen, et al. Structural characteristics and petroleum exploration potential in the deep-water area of the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 560-569.]

- [18] 李绪宣, 钟志洪, 董伟良, 等. 琼东南盆地古近纪裂陷构造特征及其动力学机制[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6): 713-721. [Li Xuxuan, Zhong Zhihong, Dong Weiliang, et al. Paleogene rift structure and its dynamics of Qiongdongnan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 713-721.]
- [19] 邵磊, 李昂, 吴国璋, 等. 琼东南盆地沉积环境及物源演变特征[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 548-552. [Shao Lei, Li Ang, Wu Guoxuan, et al. Evolution of sedimentary environment and provenance in Qiongdongnan Basin in the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 548-552.]
- [20] 姚根顺, 袁圣强, 吴时国, 等. 琼东南盆地深水区双物源沉积模式及勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 685-691. [Yao Genshun, Yuan Shengqiang, Wu Shiguo, et al. Double provenance depositional model and exploration prospect in deep-water area of Qiongdongnan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 685-691.]
- [21] 何云龙. 琼东南盆地陆坡区重力流沉积特征及其成因机制[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2012. [He Yunlong. The characteristics and mechanism of sediment gravity flow in slope area in Qiongdongnan Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2012.]
- [22] Yuan Shengqiang, Wu Shiguo, Thomas L, et al. Fine-grained Pleistocene deepwater turbidite channel system on the slope of Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(8): 1441-1451.
- [23] Huang B, Xiao X, Li X. Geochemistry and origins of natural gases in the Yinggehai and Qiongdongnan Basins, Offshore South China Sea[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34: 1009-1025.
- [24] Gong Chenglin, Wang Yingmin, Zhu Weilin, et al. The central submarine canyon in the Qiongdongnan basin, northwestern south China Sea: architecture, sequence stratigraphy, and depositional processes[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(9): 1690-1702.
- [25] 曹立成, 姜涛, 王振峰, 等. 琼东南盆地新近系重矿物分布特征及其物源指示意义[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013(5): 1971-1981. [Cao Licheng, Jiang Tao, Wang Zhenfeng, et al. Characteristics of heavy minerals and their implications for Neogene provenances evolution in Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013(5): 1971-1981.]
- [26] 陈慧, 解习农, Van Rooij D, 等. 中国南海西北次海盆西北陆缘洋陆过渡区深水沉积体系特征[J]. 沉积学报, 2014, 32(3): 442-449. [Chen Hui, Jie Xinong, Van Rooij D, et al. Characteristics of deep-water depositional systems on the northwestern margin slopes of the northwest sub-basin, South China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(3): 442-449.]
- [27] 张春生, 刘忠保, 施冬, 等. 涌流型浊流形成及发展的实验模拟[J]. 沉积学报, 2002, 20(1): 25-29. [Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao, Shi Dong, et al. The simulation experiment of surge-type turbidity current formation and development[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(1): 25-29.]
- [28] 李胜利, 于兴河, 姜平, 等. 琼东南盆地崖 13-1 气田陵三段沉积微相对储层非均质性及流动单元划分的影响[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 160-166. [Li Shengli, Yu Xinghe, Jiang Ping, et al. The influence of depositional facies on reservoir heterogeneities and flowing zone division in the 3rd Member of Lingshui Formation of Ya13-1 Gas Field in QDN Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 160-166.]
- [29] 何云龙, 解习农, 李俊良, 等. 琼东南盆地东西部块体流沉积内部结构特征的差异性[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(1): 49-56. [He Yunlong, Xie Xinong, Li Junliang, et al. Differences of MTDs characteristics between eastern and western part of Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2013, 43(1): 49-56.]
- [30] Martinsen O J, Bakken B. Extensional and compressional zones in slumps and slides in the Namurian of County Clare, Ireland[J]. Journal of the Geological Society, 1990, 147(1): 153-164.
- [31] 王英民, 徐强, 李冬, 等. 南海西北部晚中新世的红河海底扇[J]. 科学通报, 2011, 56(10): 781-787. [Wang Yingmin, Xu Qiang, Li Dong, et al. Late Miocene red river submarine fan, northwestern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(10): 781-787.]
- [32] Frey-Martínez J, Cartwright J, James D. Frontally confined versus frontally emergent submarine landslides: a 3D seismic characterisation[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(5): 585-604.
- [33] Zhang Gongcheng, Zhang Yina, Shen Huailei, et al. An analysis of natural gas exploration potential in the Qiongdongnan Basin by use of the theory of "joint control of source rocks and geothermal heat"[J]. Natural Gas Industry B, 2014, 1(1): 41-50.
- [34] 唐武, 王英民, 黄志超, 等. 琼东南盆地南部深水区中新统层序地层地震相与沉积演化特征[J]. 海相油气地质, 2012, 17(2): 20-25. [Tang Wu, Wang Yingmin, Huang Zhichao, et al. Seismic facies and sedimentary evolution characteristics of Miocene sequence strata in the deep-water region, southern Qiongdongnan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2012, 17(2): 20-25.]
- [35] 李文, 于兴河, 曾小明, 等. 南海北部陆坡神狐海域水合物调查区新近系地震相与沉积相[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(1): 17-26. [Lee Wen, Yu Xinghe, Zeng Xiaoming, et al. Study of Neogene seismic and sedimentary facies in the hydrate survey area of Shenhu region on the north margin of South China Sea[J]. Frontiers of Marine Geology, 2013, 29(1): 17-26.]
- [36] 吴嘉鹏, 王英民, 邱燕, 等. 南海北部神狐陆坡限制型滑塌体特征及成因机理[J]. 沉积学报, 2012, 30(4): 639-645. [Wu Jiapeng, Wang Yingmin, Qiu Yan, et al. Characteristic and formation mechanism of the frontally confined landslide in Shenhu slope, northern south China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(4): 639-645.]
- [37] Rangin C, Klein M, Roques D, et al. The red river fault system in the Tonkin gulf, Vietnam[J]. Tectonophysics, 1995, 243(3/4): 209-222.
- [38] 孙桂华, 彭学超, 黄永健. 红河断裂带莺歌海段地质构造特征[J]. 地质学报, 2013, 87(2): 154-166. [Sun Guihua, Peng

- Xuechao, Huang Yongjian. Geological structure characteristics of red river fault zone in the Yinggehai Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(2): 154-166.]
- [39] Schoenbohm L M, Burchfiel B C, Chen Liangzhong, et al. Miocene to present activity along the Red River fault, China, in the context of continental extrusion, upper-crustal rotation, and lower-crustal flow[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2006, 118(5/6): 672-688.
- [40] 袁圣强, 吴时国, 姚根顺. 琼东南陆坡深水水道主控因素及勘探应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(2): 61-66. [Yuan Shengqiang, Wu Shiguo, Yao Genshun. The controlling factors analysis of Qiongdongnan slope deepwater channels and its significance to the hydrocarbon exploration[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(2): 61-66.]
- [41] 袁圣强. 南海北部陆坡区深水水道沉积体系研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2009. [Yuan Shengqiang. Sedimentary system of deepwater channel, the slope area of northern South China Sea[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2009.]
- [42] 董艳蕾, 朱筱敏, 耿晓洁, 等. 利用地层切片研究陆相湖盆深水滑塌浊积扇沉积特征[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 386-396. [Dong Yanlei, Zhu Xiaomin, Geng Xiaojie, et al. Using the stratal slice to study the depositional characteristics of deep-water slumped turbidite fans in continental lake basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 386-396.]
- [43] Sprague A R G. A channelized, sand-rich, deep-sea fan deposit, lower Atoka formation (Pennsylvanian), Ouachita mountains, Oklahoma and Arkansas: abstract[J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68(4): 531.

Sedimentary Evolution of Gravity Flow Disposition of Yinggehai Formation in Qiongdongnan Basin

FU Chao¹, YU XingHe¹, JIN LiNa¹, DONG YiSi², SHAN Xin³, HE YuLin⁴

1. China University of Geoscience (Beijing), Beijing 100083, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environment Geology, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061, China

4. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

Abstract: Qiongdongnan Basin is one of China's important hydrocarbon and hydrate-bearing basin. The study of its sedimentary characteristic and deep water deposition system evolution plays a significance role to the future exploration. Based on the high precision 3D seismic data, we analysis the depositional system of the western of Ganquan Uplift in the deep area of Qiongdongnan Basin. Through the method of seismic attribute extraction and recognition, we distinguish the sedimentary characteristics of two different sedimentary bodies, including turbiditic channel and slump. The channel, influenced by the bottom flow, is parallel with the continental slope of South China Sea and combining with the asymmetric levee. Through seismic section interpretation, we can also distinguish the two sets of slide disposition. The bottom slide is a kind of normal disposition with several variable period. The top slide disposition, due to the injection of bottom flow, has a lower density and viscosity. Because of the decrease of the density and viscosity of water, these kinds of slide have wide influence range and significantly layered property. With the help of RMS-attribute slice and sedimentary reconstruction of Yinggehai Formation, we divide the evolution into three stages: the stage of sliding, the stage of erosion by bottom flow channel, and the stage of re-sliding.

Key words: slump; turbidite channel; sedimentary characteristics; sedimentary evolution; Qiongdongnan Basin